

**И. Н. Сагадеев**

Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург  
senyasagadeev@gmail.com  
Научный руководитель — проф., д-р техн. наук В. В. Березовская

## **ПРОБЛЕМЫ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ СТАЛЕЙ. ОБЗОР**

Основными задачами данного исследования были обобщение и систематизация информации о структуре и дефектах металла в сварном шве высокоазотистых сталей после лазерной сварки. Основное внимание было уделено исследованию пористости швов, образованию трещин и уходу азота из металла шва.

*Ключевые слова:* лазерная сварка, высокоазотистые стали, пористость, образование трещин, потери азота.

**I. N. Sagadeev**

## **PROBLEMS OF LASER WELDING OF HIGH-NITROGEN STEELS. OVERVIEW**

The main objective of this study was the generalization and systematization of information on the structure and defects of metal in the welds of high-nitrogen steels after laser welding. The main attention was paid to the study of the porosity of the welds, the formation of cracks and the escape of nitrogen from the weld metal.

*Key words:* laser welding, high-nitrogen steels (HNS), porosity, cracks formation, nitrogen losses.

### **Пористость**

**В** статье Лин Чжао и др. [1] было исследовано влияние различных условий лазерной сварки на появление пор в металле сварного шва. В качестве образца для исследований была выбрана высокоазотистая сталь 1Cr22Mn16N: C = 0,148 %, Si = 0,49 %, Mn = 16 %, Cr = 22,07 %, Ni = 0,47 %, N = 0,56 %, P = 0,029 %, S = 0,002 %. Микроструктура стали после термообработки (закалка от 1150 °С в воду) состоит из аустенита с небольшим количеством δ-феррита.

Как считают авторы статьи, в основном причиной пористости металла шва высокоазотистой стали может являться уход азота из шва вследствие разницы в растворимости азота в расплавленном и твердом металле, которая связана с режимом затвердевания [1].

Согласно их исследованию на пористость сварного шва влияет как состав защитного газа, так и тепловая мощность лазера. Поры в сварном шве наблюдаются при мощности лазера  $120 \text{ Дж/мм}^2$ . К тому же на пористость влияет и содержание азота в защитном газе. Учитывая обе эти характеристики, можно заключить, что при увеличении мощности до  $180 \text{ Дж/мм}^2$ , поры в шве не обнаруживаются при содержании азота в защитном газе выше, чем 25 %. То есть чем выше тепловая мощность, тем меньшее количество азота может содержаться в защитном газе.

В статье Джунхао Сан и др. [2] рассматривались проблемы устранения пористости в сварных швах на пластинах из нержавеющей стали AISI 304. На основании исследований они заключили следующее: для того чтобы снизить или вовсе избежать возникновения пор в сварных швах, необходимо использовать в качестве защитного газа либо  $\text{N}_2$ , либо смесь газов  $\text{Ar} + \text{N}_2$ , при условии, что тепловая мощность будет достаточно высокой, в соответствии с результатами в статье [1].

### **Образование трещин**

Согласно статье Инсу Ву [3] две наиболее серьезные проблемы, встречающиеся при сварке высокоазотистых нержавеющей сталей: растрескивание при затвердевании металла сварного шва и растрескивание при ликвации в зоне термического влияния.

Кристаллизационные трещины возникают в результате образования легкоплавких жидких пленок вдоль границ зерен и невозможности аккомодации ими термических усадочных напряжений, связанных с последними стадиями затвердевания металла. Следовательно, восприимчивость к растрескиванию при затвердевании зависит от количества оставшейся жидкой фазы и уровня термических напряжений, присутствующих в междендритных областях. Эта восприимчивость увеличивается элементами, которые способствуют образованию жидких фаз на границах зерен (S, P, Si, Nb, Ti и B) [3].

С другой стороны, режим затвердевания металла сварного шва может иметь сильное влияние на проявление растрескивания при затвердевании. Оно кардинально уменьшается в сварных швах, которые затвердевают в виде первичного феррита с перитектической или эвтектической кристаллизацией аустенита (FA-режим), даже при вы-

соких содержаниях фосфора и серы. Образование границ зерен по режиму FA может способствовать эффекту поглощения большой доли зернограницных сегрегаций, в частности серы. Сера, имеющая большую растворимость в  $\delta$ -феррите, чем в аустените, может преимущественно переходить в феррит, тем самым лишая границы зерен серы. Это может уменьшить вероятность образования жидких пленок, что вызвано понижением температуры солидуса вдоль границ зерен и, в свою очередь, снижением тенденции к растрескиванию при затвердевании. Вдобавок зернограницный феррит может играть значительную роль в изменении поверхностной энергии. В присутствии зернограницного феррита, так как  $\gamma$ - $\delta$ -границное поверхностное натяжение ниже, чем  $\gamma$ - $\delta$ -границное натяжение, жидкие пленки не могут проникать глубоко в границы зерен и уменьшают наклонности к растрескиванию при затвердевании [3].

Механизм ликвационного растрескивания был рассмотрен многими исследователями. Во время начального прохождения через расплавленную ванну зона термического воздействия находится под сжатием, и наличие межкристаллитных жидких пленок на этой стадии не приводят к растрескиванию. Как только сварочная ванна выходит за пределы определенной точки, сжимающие напряжения в процессе охлаждения в конечном итоге приводят к растягивающим напряжениям в зоне термического воздействия, и, если жидкие пленки присутствуют на этой стадии, растрескивание может обнаружиться. Таким образом, видно, что при прочих равных условиях чем ниже температура плавления межкристаллитных пленок объемного солидуса, тем выше будет потенциальная степень ликвационного растрескивания [3].

Присутствие серы и фосфора повсеместно идентифицируется с повышением восприимчивости к ликвационному растрескиванию в зоне термического воздействия. В несколько меньшей степени такое же влияние оказывают Si и Nb. Присутствие Si в количествах  $x > 0,3\%$  приводит к быстрому увеличению восприимчивости к ликвационному растрескиванию. Влияние титана и ниобия на восприимчивость к ликвационному растрескиванию, как правило, вредно. По-видимому, каждый из этих элементов увеличивает восприимчивость к ликвационному растрескиванию двумя возможными путями. Первый заключается в содействии формированию компонентов с низкой температурой плавления, а второй — в действии в качестве поверхностно-активного вещества, которое способствует смачиванию затвердевающих границ зерен [3].

## Потери азота

Для измерения потери азота в сварных швах были проанализированы три условия сварки с использованием метода Wave Dispersion Spectroscopy (WDS, волновая дисперсионная спектроскопия) при скоростях движения 19,1, 44,5 и 69,9 мм/с лазера (Heat 1) мощностью 900 Вт. Каждый образец анализировался в четырех местах: основной металл, поверхность сварного шва, глубина проплавления 50 % и корень сварного шва [4].

Область поверхности сварного шва имеет тенденцию к увеличению потерь по сравнению со средним и корневым участками. Поскольку верхняя часть «замочной скважины» является последней при затвердевании, вероятно, увеличение времени в расплавленном состоянии увеличивает потерю азота. Повышенная потеря азота при низких скоростях движения также подтверждает эту гипотезу: при более низких скоростях перемещения время затвердевания более длительное [4].

Низкие скорости перемещения лазера показывают повышенную потерю азота, особенно на поверхности шва. Увеличение потерь азота при низких скоростях движения может быть связано с более длительным временем выделения азота при более длительном времени затвердевания или с большей площадью поверхности расплава по сравнению с высокоскоростными сварными швами [4].

### ЛИТЕРАТУРА

- 1 Lin Z., Zhiling T., Yun P. Porosity and Nitrogen Content of Weld Metal in Laser Welding of High Nitrogen Austenitic Stainless Steel // ISIJ International. 2007. № 12. P. 1772–1775.
- 2 The elimination of pores in laser welds of AISI 304 plate using different shielding gases / S. Junhuao [et al.] // Journal of Materials Processing Tech. 2007. V. 248. P. 56–63
- 3 Insu W., Yasushi K. Weldability of High Nitrogen Stainless Steel // ISIJ International. 2002. № 12. P. 1334–1343.
- 4 Tate S., Liu S. Solidification behavior of laser welded type 21Cr–6Ni–9Mn stainless steel // Science and Technology of Welding and Joining. 2014. V. 19.